

## Przepisy dopuszczalnej emisji związków toksycznych przez silniki spalinowe pojazdów szynowych

Z uwagi na rosnące skażenie środowiska koncerny samochodowe poszukują możliwości zmniejszenia emisji substancji toksycznych będących wynikiem spalania paliwa. Wprowadza się coraz większe ograniczenia prawne emisji CO, CO<sub>2</sub>, HC, PM. Względna emisja NO<sub>x</sub> i cząstek stałych emitowanych do środowiska rośnie. Dla globalnego zmniejszenia skali problemu używa się coraz bardziej skomplikowanych technologii modernizacji silników produkowanych obecnie pojazdów szynowych. Wprowadza się nowe normy prawne regulujące emisję substancji toksycznych dotyczące wszystkich rodzajów pojazdów.

### Symbole i oznaczenia

|                 |                                                                                                                      |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a <sub>j</sub>  | współczynnik charakterystyczny dla danego związku j                                                                  |
| AVL             | Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen Prof. Dr. H. List – Instytut Spalania, Graz, Austria                          |
| CARB            | California Air Resource Board – Kalifornijska Rada ds. Zasobów Powietrza                                             |
| CCR             | California Code of Regulations – Kalifornijski Zbiór Przepisów                                                       |
| CFR             | Code of Federal Regulations – Zbiór Przepisów Federalnych (USA)                                                      |
| CH <sub>4</sub> | metan                                                                                                                |
| C <sub>j</sub>  | stężenie związku                                                                                                     |
| CLD             | Chemiluminescent Detector – detektor chemiluminescencyjny                                                            |
| CO              | tlenek węgla                                                                                                         |
| CO <sub>2</sub> | dwutlenek węgla                                                                                                      |
| COP             | Conformity Of Production – badania zgodności produkcji (kontrola jakości produkcji)                                  |
| CVS             | Constant Volume Sample – stała objętość próbki (układ rozrzedzający spaliny powietrzem o stałym natężeniu przepływu) |
| D <sub>B</sub>  | stopień dymienia w jednostkach skali Boscha                                                                          |
| DI              | Direct Injection – wtrysk bezpośredni (dotyczy silników ZS)                                                          |
| E <sub>j</sub>  | godzinowa emisja zanieczyszczeń                                                                                      |
| e <sub>j</sub>  | jednostkowa emisja zanieczyszczeń                                                                                    |
| EC              | European Community – Wspólnota Europejska                                                                            |
| ECE             | Economic Commission for Europe – Europejska Komisja Gospodarcza (agenda ONZ)                                         |
| EEC             | European Economic Community – Europejska Wspólnota Gospodarcza                                                       |
| EPA             | Environment Protection Agency – Urząd Ochrony Środowiska w USA                                                       |
| ERRI            | European Rail Research Institute – Europejski Instytut Badań Kolejowych                                              |
| ESC             | European Stationary Cycle – europejski test stacjonarny                                                              |
| ETC             | European Transient Cycle – europejski test niestacjonarny dla silników ZS                                            |
| EU              | European Union – Unia Europejska                                                                                     |
| FID             | Flame Ionisation Detector – analizator płomieniowo-jonizacyjny                                                       |
| FTP             | Federal Test Procedure – federalny test jezdny USA                                                                   |
| g <sub>c</sub>  | jednostkowe zużycie paliwa                                                                                           |
| G <sub>sp</sub> | masowe natężenie przepływu spalin                                                                                    |
| HC              | Hydrocarbons – węglowodory                                                                                           |
| HCHO            | aldehyd mrówkowy (formaldehyd)                                                                                       |
| HD-D            | Heavy Duty Diesel – duże, wysilone silniki o zapłonie samoczynnym                                                    |
| HD-D DI         | Heavy Duty Diesel Direct Injection – duże, wysilone silniki o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim          |
| H-CLD           | Heated Chemiluminescent Detector – grzany detektor chemiluminescencyjny                                              |
| HDV             | Heavy Duty Vehicle – ciężki pojazd samochodowy                                                                       |
| H-FID           | Heated Flame Ionisation Detector – grzany analizator płomieniowo-jonizacyjny                                         |
| ISO             | International Standards Organisation – Międzynarodowa Organizacja Normalizacji                                       |
| LD-D            | Light Duty Diesel – silniki o zapłonie samoczynnym do pojazdów dostawczych                                           |
| k               | współczynnik absorpcji                                                                                               |
| M <sub>o</sub>  | moment obrotowy                                                                                                      |
| MVEG            | Motor Vehicle Emissions Group – Komisja ds. Emisji Pojazdów Silnikowych                                              |
| n               | prędkość obrotowa wału korbowego                                                                                     |
| N               | współczynnik zaczernienia spalin                                                                                     |
| NDIR            | Non-Dispersive Infrared – analizator niedyspersyjny na podczerwień                                                   |

|                 |                                                                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| N <sub>e</sub>  | moc użyteczna silnika                                                                              |
| NMHC            | Non Methane Hydrocarbons – węglowodory bez udziału metanu                                          |
| NO              | tlenek azotu                                                                                       |
| NO <sub>2</sub> | dwutlenek azotu                                                                                    |
| NO <sub>x</sub> | Nitrogen Oxides – tlenki azotu                                                                     |
| O <sub>3</sub>  | Ozone – ozon                                                                                       |
| ORE             | Office de Recherches et d'Essais – Kolejowy Urząd Badań i Prób (Francja)                           |
| p <sub>e</sub>  | ciśnienie efektywne                                                                                |
| Pb              | ołów                                                                                               |
| PAH             | Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne                      |
| PM              | Particulate Matter – cząstki stałe                                                                 |
| PMD             | Para Magnetic Detector – analizator paramagnetyczny                                                |
| ppm             | parts per million – ilość części na milion                                                         |
| Q               | natężenie przepływu spalin                                                                         |
| SO <sub>2</sub> | dwutlenek siarki                                                                                   |
| SO <sub>3</sub> | trójtlenek siarki                                                                                  |
| T               | temperatura                                                                                        |
| t               | czas                                                                                               |
| TA              | Type Approval – zatwierdzenie typu (homologacyjne)                                                 |
| THC             | Total Hydrocarbons – całkowita (sumaryczna) emisja HC                                              |
| THCE            | Total Hydrocarbons Equivalent – ekwiwalent całkowitej emisji HC                                    |
| u <sub>i</sub>  | współczynnik wagowy                                                                                |
| UIC             | Union Interantionale des Chemins de Fer – Międzynarodowy Związek Kolejowy                          |
| US-HDDTT        | United States-Heavy Duty Diesel Transient Test - niestacjonarny amerykański test dla silników HD-D |
| V               | prędkość liniowa                                                                                   |
| ZI              | silnik o zaplonie iskrowym                                                                         |
| ZS              | silnik o zaplonie samoczynnym                                                                      |

## 1. Wstęp

Ochrona środowiska naturalnego jest jednym z najważniejszych zadań, przed jakimi stanął człowiek u progu XXI wieku. Emisja szkodliwych związków chemicznych do atmosfery, gleby i wody poważnie ograniczyła zasoby naturalne Ziemi. Eksploatacja naturalnych, nieodnawialnych źródeł energii i surowców powoduje ich systematyczne wyczerpywanie.

Związana z rozwojem techniki, obserwowana od kilku dziesięcioleci w świecie rewolucja techniczna, powoduje coraz większe zapotrzebowanie na energię. Wyzwała to wiele zagrożeń, do których w pierwszym rzędzie należy zaliczyć skutki spalania wszelkiego rodzaju paliw.

Przewiduje się, że tłokowy silnik spalinowy w ciągu najbliższego półwiecza będzie podstawowym źródłem napędu pojazdów samochodowych [19]. Przy rozwoju silników spalinowych brane są pod uwagę różne ich aspekty (tabl. 1), a ich ważność zależy od różnych czynników, nie tylko technicznych [18,19].

Stosowanie silników spalinowych ma znaczący udział w emisji zanieczyszczeń. W wyniku spalania paliw węglowodorowych emitują one do atmosfery dwutlenek węgla CO<sub>2</sub>, tlenek węgla CO, związki azotu NO<sub>x</sub>, węglowodory HC, cząstki stałe PM, związki ołowiu Pb i związki siarki SO<sub>2</sub> i SO<sub>3</sub>.

Pomiar toksyczności spalin tłokowych silników spalinowych stosowanych w pojazdach szynowych jest złożonym zagadnieniem, co wynika z warunków ich użytkowania. Obciążenia lokomotyw pracujących w ruchu manewrowym i podczas prac pomocniczych mają całkowicie odmienny charakter od obciążeń w ruchu liniowym.

Opracowaniem zaleceń w aspekcie ochrony środowiska zajmują się m.in. Międzynarodowy Związek Kolejowy (UIC) oraz Europejski Instytut Badań Kolejowych (ERRI).

Rynkiem, na którym eksploatowana jest największa liczba lokomotyw są Stany Zjednoczone (około 18 500 szt.; rys. 1). Lokomotywy te wyposażone są niemal wyłącznie w silniki ZS HD-D DI. Lokomotywy spalinowe w USA (ze względu na udział w rynku światowym) mają znaczący wkład w krajową emisję składników toksycznych (rys. 2).

Czynniki ekologiczne i ekonomiczne decydujące o powodzeniu silnika

Tablica 1

| Prawodawstwo                            | Spółeczeństwo                   | Klient                          | Producent                         |
|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1. emisja: HC, NO <sub>x</sub> , CO, PM | 2. dymienie                     | 3. zużycie paliwa               | 4. łatwość produkcji              |
| 5. hałas                                | 6. zapach                       | 7. trwałość                     | 8. jakość                         |
| 9. zużycie paliwa / CO <sub>2</sub>     | 10. hałas (subiektywny)         | 11. osiągi i zdolności napędowe | 12. koszt produkcji               |
| 13. recykling                           | 14. zużyte pojazdy i podzespoły | 15. niezawodność                | 16. zysk                          |
| 17. bezpieczeństwo                      |                                 | 18. utrzymanie                  | 19. utrzymanie rynku, konkurencja |
|                                         |                                 | 20. cena                        |                                   |

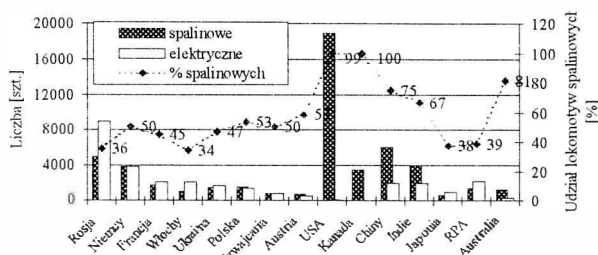
Źródło: Wojcik K.M., Carstensen H., Cartellieri W.: Progress in the pollutant reduction of vehicle engines. 3rd Symposium: Traffic Induced Air Pollution - Emissions, Impact and Air Quality, TU-Graz, 1996

## 2. Przepisy ogólne dopuszczalnej emisji toksycznych składników spalin

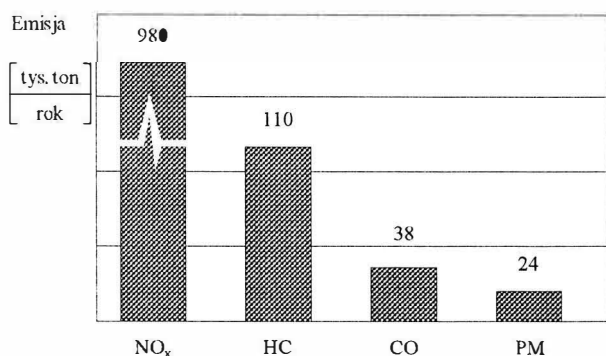
Badania emisji spalin, które są wykonywane w typowych laboratoriach można umownie podzielić na rozwojowe i kontrolne.

W ramach badań rozwojowych wykonywane są

różne prace związane z opracowywaniem nowych modeli pojazdów i silników, układami zasilania, systemami obniżającymi zawartość związków szkodliwych w spalinach itd. Do tego typu badań stosuje się rozbudowaną aparaturę pomiarową pozwalającą na ciągłą analizę spalin i analizę modalną, co umożliwia wykonanie pomiarów praktycznie w każdej fazie testu (np. przyspieszanie, hamowanie, bieg jałowy itd.) [17].



Rys. 1. Podział lokomotyw na rynkach wybranych państw  
Źródło: Materiały firm: AVL, BOSMAL, BECKMAN, HORIBA, RICARDO

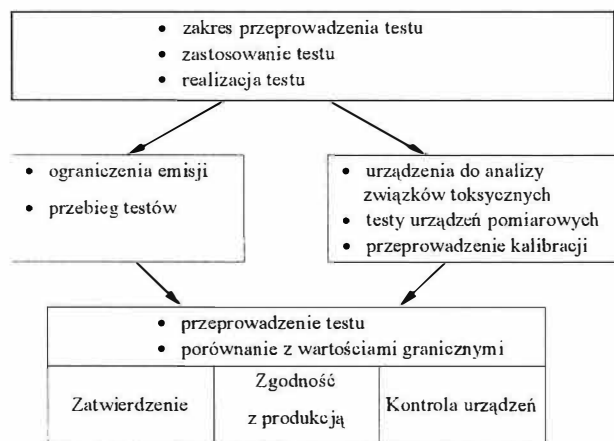


Rys. 2. Roczna emisja składników toksycznych spalin lokomotyw w USA  
Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

W ramach badań kontrolnych można rozróżnić [5,6,16]:

- badania homologacyjne (TA; certyfikacja),
- badania zgodności produkcji (COP; badania pojazdów wziętych losowo z produkcji seryjnej na zgodność z homologowanym typem).

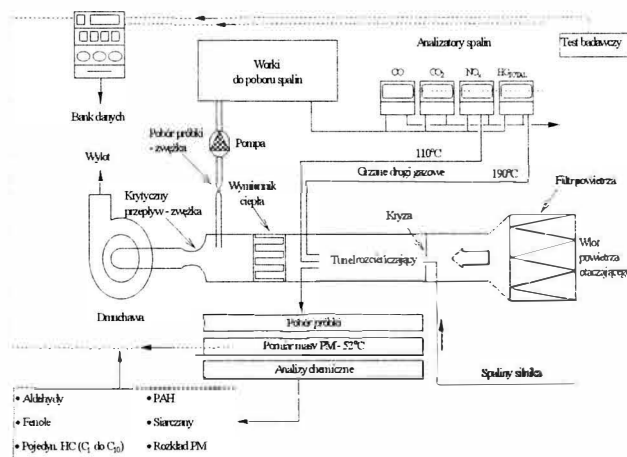
Zasady prowadzenia tych badań i szczegółowe wymagania (limity) określa się w przepisach wydawanych przez specjalne agencje; są to: EPA i CARB w USA i ECE (agenda ONZ) wydająca regulaminy ECE oraz EC (EU – obecnie Unia Europejska) wydająca dyrektywy EC w Europie (rys. 3).



Rys.3 Struktura uregulowań prawnych dotyczących emisji związków toksycznych

Źródłem napędu pojazdów o masie całkowitej powyżej 3 500 kg są prawie wyłącznie silniki ZS o wtrysku bezpośrednim (określane jako HD-D DI). Silniki tego typu produkowane są poza wytwórniami pojazdów (w fabrykach silników), na ogół jako wielozadaniowe, a więc przeznaczone do współpracy z różnymi rodzajami pojazdów. Tego typu silniki mogą być również stosowane do napędu pojazdów szynowych.

Wobec powyższego do badań emisji składników toksycznych najbardziej odpowiednie i wygodne są testy stacjonarne wykonywane na hamowniach silnikowych (rys. 4). Głównym testem jest hamowniany stacjonarny test 13-fazowy (rys. 5) o różnych współczynnikach udziału pracy w fazie ( $u_i$ ), określany w Europie przez Regulamin ECE R49.03. Na jego podstawie określa się średnią emisję poszczególnych składników toksycznych spalin na jednostkę mocy badanego silnika (rys. 6).



Rys.4. Schemat pomiarowy do szczegółowych badań silnika

Godzinową emisję poszczególnych składników toksycznych dla każdej  $i$ -tej fazy testu oblicza się na podstawie zależności:

$$E_{i,j} = a_j \cdot C_{j,i} \cdot G_{sp,i} \quad [\text{g/h}] \quad (1)$$

gdzie:

$j$  – CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, PM,

$a_j$  – współczynnik charakterystyczny dla

danego związku  $j$ :

$$a_{CO} = 0,000966,$$

$$a_{NOx} = 0,001587,$$

$$a_{CO2} = 0,001519,$$

$$a_{PM} = 0,000763,$$

$$a_{HC} = 0,000478$$

$C_{j,i}$  – stężenie poszczególnych związków [ppm],

$G_{sp}$  – wydatek spalin [kg/h].

Średnią emisję jednostkową  $e_j$  oblicza się z zależności [11]:

$$e_j = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_{j,i} \cdot u_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot u_i} \quad [\text{g/kWh}] \quad (2)$$

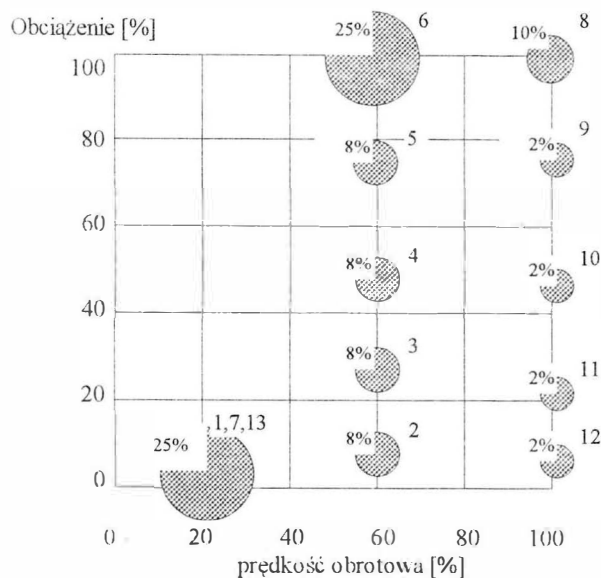
a średnią wartość dymienia według wzoru:

$$D_B = \sum_{i=1}^{13} D_{Bi} \cdot u_i \quad [\text{j.s.B.}], \quad (3)$$

gdzie:

$D_{Bi}$  – zadymienie spalin w  $i$ -tej fazie,

$u_i$  – współczynnik udziału  $i$ -tej fazy.

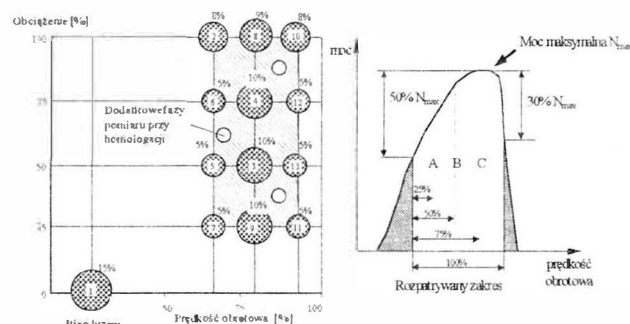


Rys. 5. Rozkład faz testu ECE R49

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

Norma EURO III i IV - 2000/2005r przewiduje dla silników ZS test stacjonarny ESC podobny do testu 13-fazowego, lecz o innych wartościach współczynników udziału  $u_i$  oraz innej kolejności faz (rys. 7). Test składa się z 13. faz stałych oraz trzech faz dodatkowych. Komisja MVEG proponuje dla wszystkich silników HD-D wprowadzenie, oprócz testu ESC, niestacjonarnego testu europejskiego ETC (rys. 8). Ta sama Komisja proponuje ujednolicenie w skali światowej przebiegu testów.

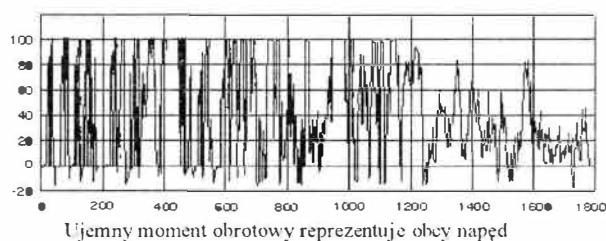
Przepisy federalne (CFR) i kalifornijskie (CCR) w USA, obecne i przyszłościowe, są zbieżne ze sobą (tabl. 2), a różnią się jedynie czasem wprowadzenia procentowego udziału produkowanych pojazdów je spełniających oraz nieco odmiennymi przebiegami badań, szczegółowo opisanymi w [2,3,4].



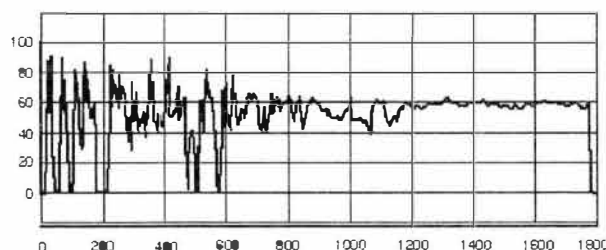
Rys. 7. Schemat nowego testu ESC przewidzianego normą EURO III do pomiaru emisji związków toksycznych oraz zadymienia

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

Moment obrotowy [%]

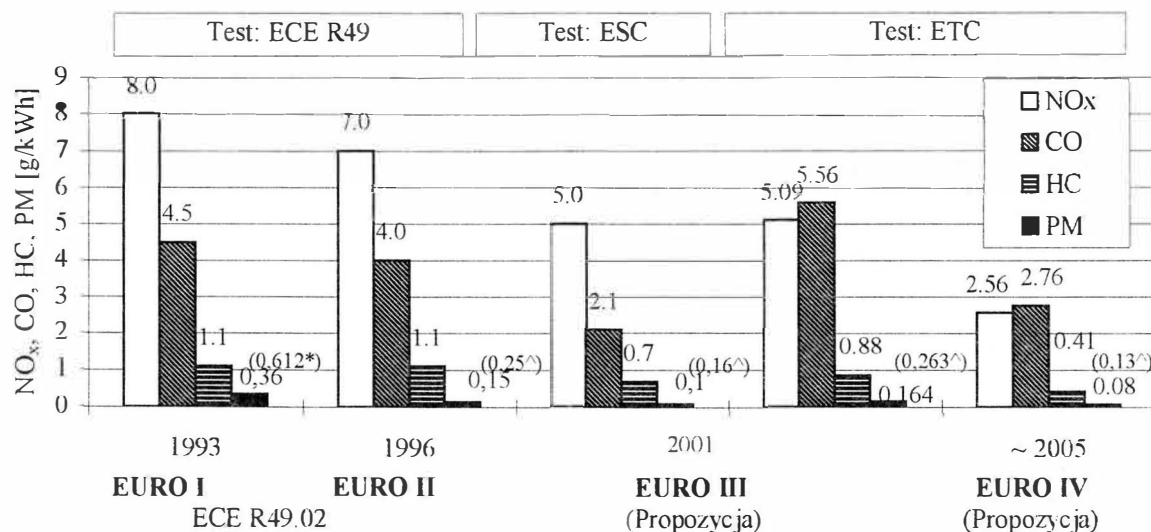


Prędkość obrotowa [%]



Rys. 8. Przebieg hamownianego testu jezdny test ETC

Źródło: Materiały firm: AVL, BOSMAL, BECKMAN, HORIBA, RICARDO



Rys. 6. Europejskie normy emisji związków toksycznych dla pojazdów HDV (\* - dla mocy  $N_e \leq 85 \text{ kW}$ ; ^ - dla prędkości obrotowej  $n > 3000 \text{ obr/min}$  i objętości skokowej jednego cylindra  $V_s < 0.7 \text{ dm}^3$ ; dodatkowy test dymienia ECE R24.03 (72/306/EEC))

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

Dla pojazdów ciężkich, wyposażonych w silniki ZS HD testy badawcze wykonuje się na hamowni silnikowej, na której wykonuje się niestacjonarny test US-HDDTT (rys. 9) z układem CVS o pojedynczym lub podwójnym rozcieńczeniu spalin do pomiaru PM. Test niestacjonarny US-HDDTT, który mimo że wykonywany jest na hamowni silnikowej, charakteryzuje się takim przebiegiem momentu i prędkości obrotowej, jak byłby wykonywany na hamowni podwoziowej. Dla symulacji tego testu opracowano w AVL [9] jego wersję stacjonarną – test 8-fazowy (8-Mode-Cycle) (rys. 10). Wyniki emisji pomiędzy US-HDDTT i 8-Mode-Cycle, podawane w g/kWh (US-HDDTT w g/KMh) nie różnią się zasadniczo od siebie, co umożliwia pewne porównywanie ich między sobą [10].

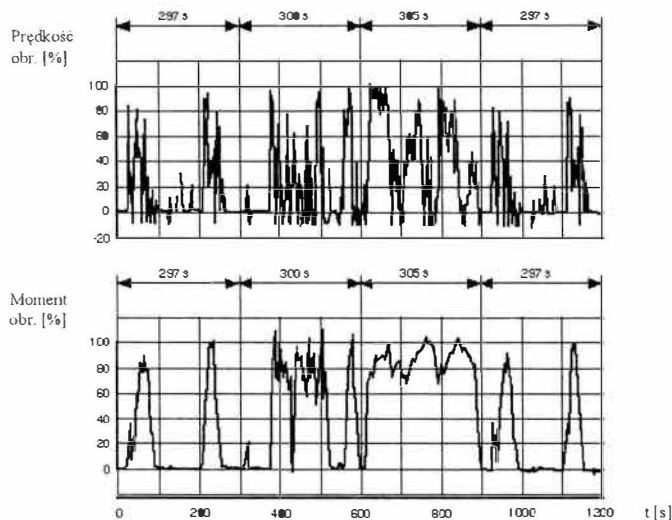
Dla wszystkich rodzajów silników ZS wykonuje się tzw. *free acceleration*, czyli pomiar zacinienia spalin i współczynnika absorpcji  $k$  na biegu luzem przy swobodnym przyspieszaniu silnika:  $n_{\min} \rightarrow n_{\max}$  (rys. 11). Wykonuje się go po kolei trzy razy, a następnie oblicza wartość średnią. W Polsce test ten obowiązuje od 1.05.1993. Według dyrektywy EEC 92/55 [2] maksymalne wartości współczynnika absorpcji  $k$  wynoszą dla silnika: wolnossącego  $k = 2,5 \text{ m}^{-1}$  (odwrotność jednostki długości) ( $\approx 4,75 \text{ j.s.B.}$ ) i turbodoładowanego  $k = 3,0 \text{ m}^{-1}$  ( $\approx 5,1 \text{ j.s.B.}$ ).

Ustawodawstwo normujące emisję związków toksycznych [g/kWh]  
silników ZS (Heavy Duty) w USA

Tabela 2

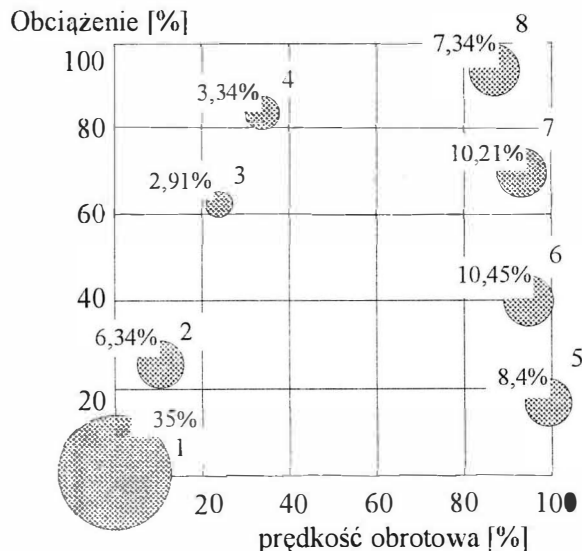
| Norma                         | CO   | HC    | NO <sub>x</sub> | PM           | Test     |
|-------------------------------|------|-------|-----------------|--------------|----------|
| USA 1996 CFR T40 §86.096-11 ▲ | 21   | 1,8   | 6,8             | 0,14 (0,07*) |          |
| USA 1998 CFR T40 §86.098-11 ▲ | 21   | 1,8   | 5,4             | 0,14 (0,07*) | US-HDDTC |
| Kalifornia Standard           | 19,6 | 5,3 ♦ | (-♥)            | 0,14 (0,07*) |          |
| CCR T13 LEV                   | 19,6 | 4,8 ♦ | (0,068 ♥)       | 0,14 (0,07*) |          |
| S 1956.8 ▲                    | 9,8  | 3,4 ♦ | (0,034 ♥)       | 0,07         |          |

Uwagi: ▲ - dodatkowy test dymienia CFR T40 Subpart 1; ▲ - spełnienie dla przebiegu 470 000 km lub 8 lat;  
♦ - NMHC + NO<sub>x</sub>; ♥ - autobusy miejskie (spełnienie dla przebiegu 470 000 km lub 10 lat);  
♥ - HCHO; normy USA przeliczono na g/kWh, mimo że oryginalnie są w g/KMh



Rys. 9. Niestacjonarny test US-Heavy Duty-Diesel-Transient-Test

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997



Rys. 10. Test 8-fazowy symulujący US-HDDTT (całość – 84%, 16% – nie uwzględnia się – obcy napęd silnika)

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

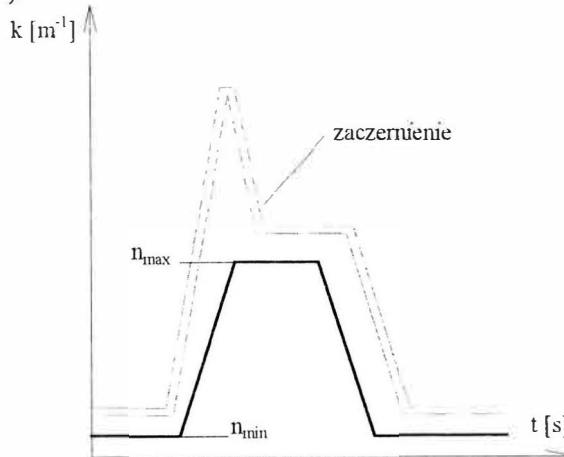
Wartość współczynnika absorpcji oblicza się według wzoru:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^3 k_i}{3} \quad [\text{m}^{-1}], \quad (4)$$

gdzie:  $k_i$  – wartość współczynnika absorpcji w kolejnej próbie [ $\text{m}^{-1}$ ].

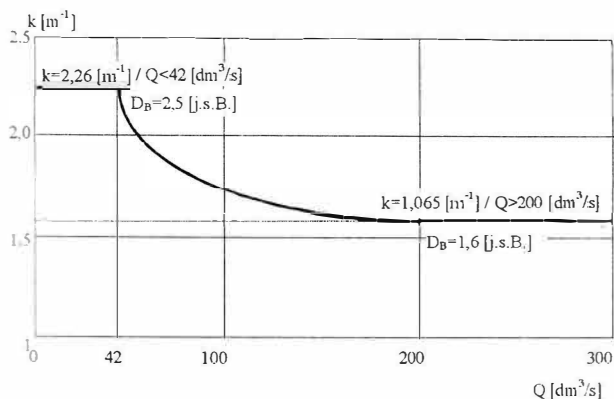
Ponadto w Europie wykonuje się stacjonarny test dymienia ECE R24.03, którego pomiar odbywa się przy pełnym przepływie spalin i w którym określa się współczynnik absorpcji  $k$  [ $\text{m}^{-1}$ ] dla teoretycznego natężenia przepływu spalin  $\dot{Q}$  [ $\text{dm}^3/\text{s}$ ]. W czasie testu silnik pracuje przy pełnym obciążeniu, czyli w warunkach charakterystyki pełnej mocy, a wartości  $k$  nie mogą przekraczać dopuszczalnego limitu podanego na rysunku 12.

Normy zadymienia spalin według US określa EPA Smoke Test Cycle (rys. 13). Dopuszczalne wartości zadymienia zawarte są w normie CFR T40 Subpart 1 (tabl. 3).



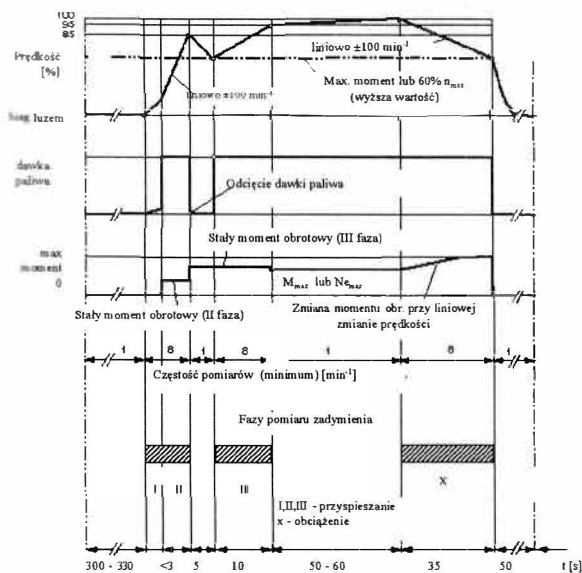
Rys. 11. Test zadymienia spalin przy swobodnym przyspieszaniu na biegu luzem

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997



Rys. 12. Stacjonarny test dymienia ECE R24

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997



Rys. 13. Test zadymienia spalin US EPA Smoke Test

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

#### Maksymalne wartości zadymienia spalin dla silników HD-D DI

Tablica 3

| Faza cyklu     | Przyspieszanie | Prędkość stała | Max. obciążenie |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| zadymienie [%] | 20%            | 15%            | 50%             |

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

Dla pojazdów z silnikami ZS, EPA proponuje następujące przedsięwzięcia:

- limit wartości  $\text{NO}_x + \text{NMHC}$  na poziomie 3,4 g/KM·h, lub
- limit wartości  $\text{NO}_x + \text{NMHC}$  na poziomie 3,5 g/KM·h, przy wartości NMHC na poziomie 0,7 g/KM·h.

Przewiduje się wydłużenie okresu „życia pojazdu” do 700 000 km (zamiennie 22 000 godzin lub 10 lat).

### 3. Przepisy dotyczące silników spalinowych pojazdów szynowych

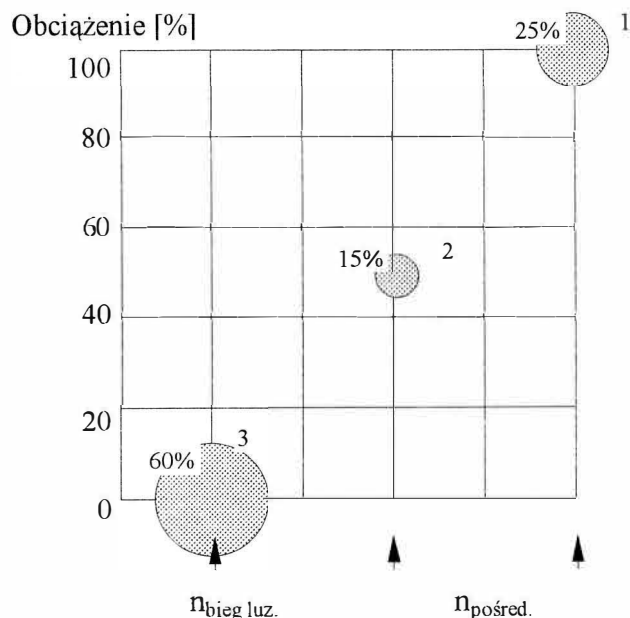
#### 3.1 Przepisy europejskie

##### 3.11 Karta UIC 623 1-2-3

W Unii Europejskiej (EU) wprowadzono opracowany przez ISO, nowy test badawczy ISO 8178, a wraz z

nim, dopuszczalne normy emisji związków toksycznych dla niesamochodowych zastosowań silników spalinowych [8]. Jest to test 11-fazowy wykonywany na hamowni silnikowej, na podstawie którego określa się średnią emisję poszczególnych składników toksycznych spalin. Współczynniki udziału  $u_i$  w  $i$ -tej fazie są zmienne i dobierane w zależności od zastosowania silnika (widma obciążeń silnika). Czas pracy silnika podczas każdej fazy powinien wynosić minimum 10 minut, przy czym maksymalny jest nieograniczony i wynika z wymogów pomiaru emisji cząstek stałych, natomiast emisję gazową mierzy się w ostatnich trzech minutach danej fazy.

Dla silników trakcji szynowej: lokomotyw (w tym przetokowych) oraz autobusów szynowych test zostaje zredukowany do trzech faz (rys. 14).



Rys. 14. Rozkład faz testu ISO 8178-F

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

Prędkość obrotowa wału korbowego dla prędkości pośredniej przyjmowana jest dla maksymalnego momentu obrotowego silnika, jeśli zawiera się pomiędzy 60%-75% maksymalnej prędkości obrotowej, lub 60% max. prędkości obrotowej jeśli jest wyższa, lub 75% max. prędkości obrotowej jeśli jest ona niższa.

Dopuszczalne wartości emisji zostały ustalone w 1997r. i mają zastosowanie do nowo produkowanych silników ZS trakcji kolejowej (ISO 8178-F). Dopuszczalne wartości emisji składników toksycznych podano w tablicy 4.

#### Dopuszczalne wartości emisji wg UIC 623 1-2-3

Tablica 4

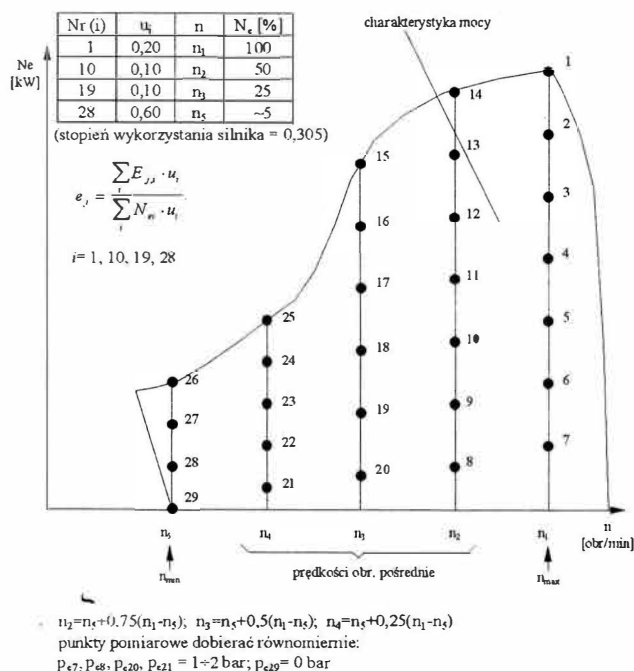
| Emisja [g/kWh] |     |               | $D_B$ [j.s.B]            |
|----------------|-----|---------------|--------------------------|
| CO             | HC  | $\text{NO}_x$ | Zadymienie <sup>*)</sup> |
| 3              | 0,8 | 12            | 2,5 ÷ 1,6                |

<sup>\*)</sup> pomiar zadymienia spalin: pełne obciążenie / średnia prędkość obrotowa

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997

### 3.1.2. Normy ORE B13

Test badawczy składa się z pomiaru emisji składników toksycznych, które określa Regulamin ORE B13 (ORE od 1992r. zostało przekształcone w ERRI) (rys. 15). Do obliczeń należy uwzględnić 4 punkty pomiarowe i współczynniki szacunkowe [13]. Średnią emisję składników toksycznych wyznacza się ze wzoru (2). Dopuszczalne wartości zadymienia spalin określa się w jednostkach skali Boscha według schematu przedstawionego na rysunku 12. Dopuszczalne wartości emisji przedstawiono w tabelicy 5.



Rys. 15. Przebieg testu ORE B13

Źródło: Raport ORE B13

#### Dopuszczalne wartości emisji według ORE B13

Tabela 5

| Emisja [g/kWh] |     |                 |
|----------------|-----|-----------------|
| CO             | HC  | NO <sub>x</sub> |
| 4              | 1,6 | 16              |

Źródło: Raport ORE B13

### 3.2. Przepisy amerykańskie

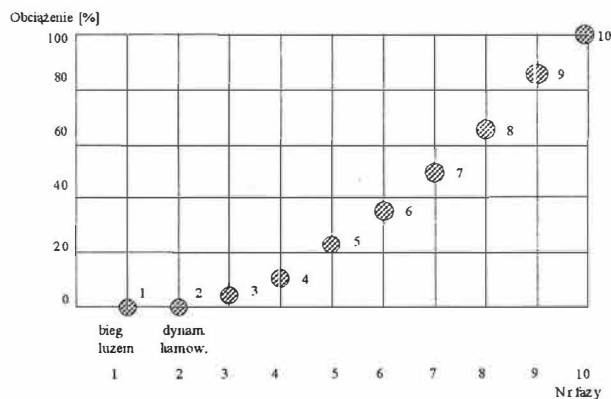
Ze względu na znaczny udział silników ZS w transporcie kolejowym USA przewiduje się redukcję emisji NO<sub>x</sub> o około 60%, o 50% redukcję HC i PM oraz o 15% redukcję emisji CO do roku 2010 [7]. W USA wprowadzono 10-fazowy test badawczy (rys. 16) dla spalinowych pojazdów trakcyjnych różniący się wagami w poszczególnych fazach [7].

Spalinowe pojazdy trakcyjne w USA zostały podzielone na 3 grupy:

- o mocy do 1500 kW - manewrowe,
- o mocy ok. 2200 kW - lokomotywy do pociągów pasażerskich,
- o mocy ponad 3000 kW - lokomotywy towarowe.

Etapy wprowadzania standardów emisji:

- Tier 0 Zastosowanie do silników produkowanych od 1973r. do 1999r.
- Tier 1 Zastosowanie do silników produkowanych od 2000r. do 2004r.
- Tier 2 Zastosowanie do silników produkowanych po 2005r.



Rys. 16. Przebieg testu 10-fazowego EPA

Źródło: Environmental benefits of proposed emission standards for locomotives, EPA 420-F-97-009, February 1997

#### Udziały procentowe faz 10-fazowego testu badawczego USA

Tabela 6

| Nr fazy | Obciążenie [% Ne <sub>max</sub> ] | Udział poszczególnych grup lokomotyw [%] |             |          |
|---------|-----------------------------------|------------------------------------------|-------------|----------|
|         |                                   | manewrowe                                | pasażerskie | towarowe |
| 1       |                                   | 38,0                                     | 47,4        | 59,8     |
| 2       |                                   | 12,5                                     | 6,2         | 0,0      |
| 3       | 4,5                               | 6,5                                      | 7,0         | 12,4     |
| 4       | 11,5                              | 6,5                                      | 5,1         | 12,3     |
| 5       | 23,5                              | 5,2                                      | 5,7         | 5,8      |
| 6       | 35,0                              | 4,4                                      | 4,7         | 3,6      |
| 7       | 48,5                              | 3,8                                      | 4,0         | 3,6      |
| 8       | 64,0                              | 3,9                                      | 2,9         | 1,5      |
| 9       | 85,0                              | 3,0                                      | 1,4         | 0,2      |
| 10      | 100,0                             | 16,2                                     | 15,6        | 0,8      |

Źródło: Environmental benefits of proposed emission standards for locomotives, EPA 420-F-97-009, February 1997

Wartości dopuszczalnych emisji składników toksycznych w zależności od etapu wprowadzenia normy przedstawiono w tabelicy 7.

Normą objęty jest również pomiar zaczernienia spalin N [%] podległy etapom Tier 0÷2. Pomiar realizowany jest podczas przyspieszania od prędkości biegu jałowego (faza 1) do prędkości obrotowej mocy maksymalnej (faza 10). Dopuszczalne wartości zaczernienia, w zależności od średnicy rury wylotowej i sposobu pomiaru podano w tabelicy 8.

#### Dopuszczalne emisje [g/KMh] składników toksycznych w teście 10-fazowym

Tabela 7

| Etap   | Typ pojazdu            | THC <sup>1)</sup> | NMHC <sup>2)</sup> | THCE <sup>3)</sup> | Aldehydy <sup>3)</sup> | CO  | NO <sub>x</sub> | PM   |
|--------|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-----|-----------------|------|
| Tier 0 | towarowe + pasażerskie | 1,0               | 1,0                | -                  | -                      | 5,0 | 9,5             | 0,60 |
|        | manewrowe              | 2,1               | 2,1                | -                  | -                      | 8,0 | 14,0            | 0,72 |
| Tier 1 | towarowe + pasażerskie | 0,55              | 0,55               | 0,55               | 0,035                  | 2,2 | 7,4             | 0,45 |
|        | manewrowe              | 1,2               | 1,2                | 1,2                | 0,076                  | 2,5 | 11,0            | 0,54 |
| Tier 2 | towarowe + pasażerskie | 0,3               | 0,3                | 0,3                | 0,018                  | 1,5 | 5,5             | 0,20 |
|        | manewrowe              | 0,6               | 0,6                | 0,6                | 0,036                  | 2,4 | 8,1             | 0,24 |

<sup>1)</sup> Diesel, bio-diesel lub kombinacja paliw z olejem napędowym jako paliwem głównym.

<sup>2)</sup> Tylko silniki na gaz naturalny, lub kombinacja paliw, gdzie gaz stanowi paliwo podstawowe.

<sup>3)</sup> Silniki zasilane alkoholem, lub kombinacja paliw, gdzie alkohol stanowi paliwo podstawowe.

Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997.

### 4. Aparatura pomiarowa składników toksycznych spalin

#### 4.1. Metody pomiaru związków toksycznych

Aparatura pomiarowa (rys. 17) umożliwia przeprowadzenie analizy wytwarzanych związków toksycznych przez wszystkie

# Dopuszczalne wartości zanieczyszczenia spalin N [%] według EPA

Tablica 8

| Typ układu wylotowego | Srednica rury wylotowego     | Typ badanej sekcji    | Warunki ustalone | 30-sek. przyspiesz. | 3-sek. przyspiesz. |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| pojedynczy wylot      | 12" lub mniej więcej niż 12" | całkowita             | 20               | 35                  | 50                 |
|                       |                              | każdy 6" segment      | 10               | 15                  | 20                 |
|                       |                              | całkowita             | 30               | 40                  | 55                 |
| wielokrotny wylot     | 12" lub mniej więcej niż 12" | dowolna               | 20               | 35                  | 50                 |
|                       |                              | suma sekcji           | 30               | 40                  | 55                 |
|                       |                              | każdy 6" segment      | 10               | 15                  | 20                 |
|                       |                              | całkowity suma sekcji | 30               | 40                  | 55                 |
|                       |                              |                       | 40               | 50                  | 60                 |

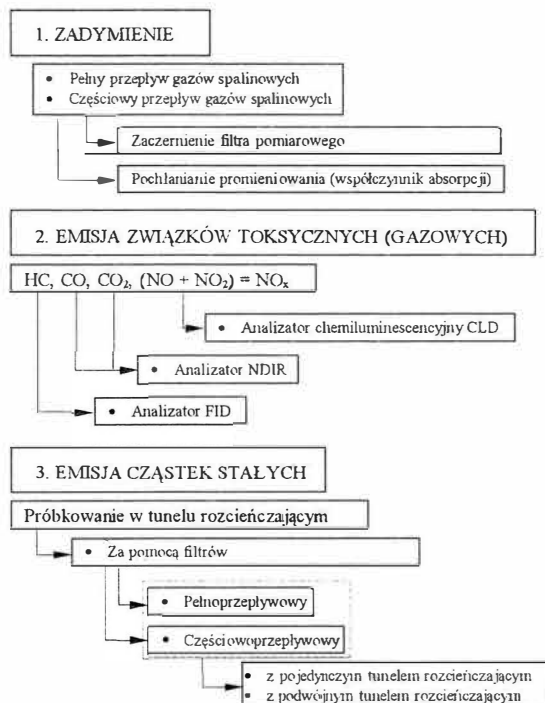
Źródło: AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997.

rodzaje tłokowych silników spalinowych (ZI i ZS: LD-D i HD-D), przy zasilaniu różnymi rodzajami paliw, zamontowanych w pojeździe lub bezpośrednio na hamowni silnikowej.

Współczesne metody określania związków emitowanych przez silniki spalinowe (rys. 18), umożliwiające przeprowadzenie ich analizy ilościowej, są bardzo liczne. Do najbardziej znanych należą metody wykorzystujące zjawiska [11,12]:

- absorpcji części widma podczerwonego (NDIR) lub ultrafioletowego,
- jonizacji powietrza podczas spalania węglowodorów (FID),
- chemiluminescencji (CLD),
- paramagnetyzmu gazów (PMD),
- przewodnictwa cieplnego gazów,
- chromatografii.

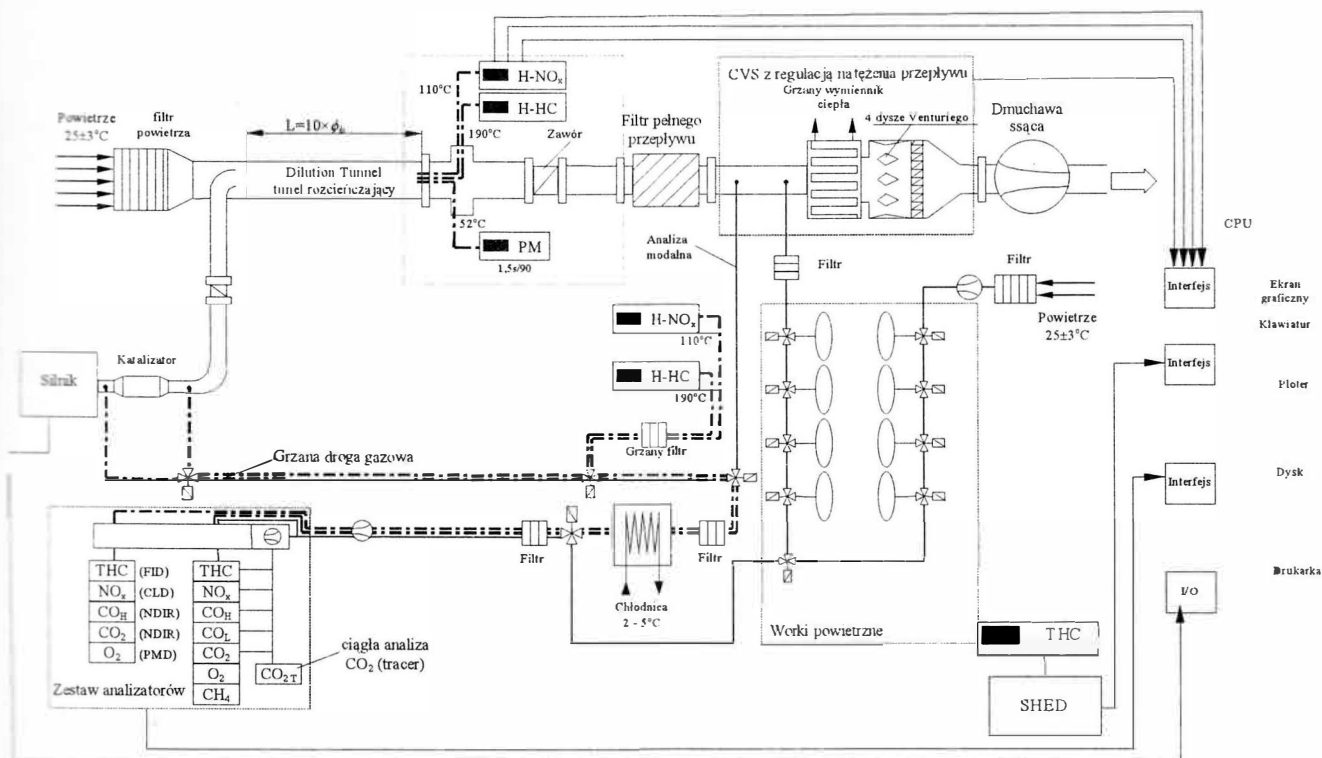
Według aktualnie obowiązujących przepisów, podstawowe badania gazów spalinowych silników lub emisję związków z całych pojazdów należy wykonywać za pomocą następujących analizatorów [12,15]:



Rys. 18. Metodyka pomiarów związków toksycznych silnika spalinowego

Źródło: Merksz J.: Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997

- CO i CO<sub>2</sub> – analizator niedyspersyjny, absorbujący promienie podczerwone – NDIR,
- HC – analizator płomieniowo-jonizujący FID (dla silników ZS z grzaną drogą gazową o temperaturze 190°C - H-FID)
- NO<sub>x</sub> – analizator chemiluminescencyjny CLD z konwerterem NO<sub>2</sub>/NO dla silników ZS HD-D z grzaną drogą gazową - H-CLD - 110°C)
- PM – grawimetryczna metoda pomiarowa (temp. 52°C).



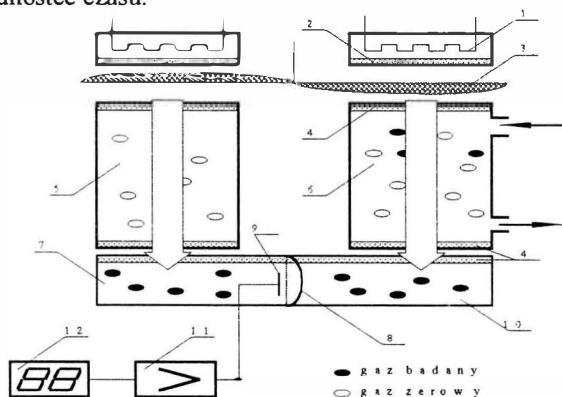
Rys. 17. Schemat aparatury pomiarowej do analizy ciągłej i uśrednionej silników ZS HD-D

Analizatory typu NDIR wykorzystują jedną z metod spektrometrycznych, polegającą na pomiarze fotometrem całkowitej absorpcji promieniowania w wąskim paśmie długości fal charakterystycznych dla danego związku. Wykorzystywane są one w badaniach zawartości CO, CO<sub>2</sub> oraz rzadziej SO<sub>2</sub> w spalinach.

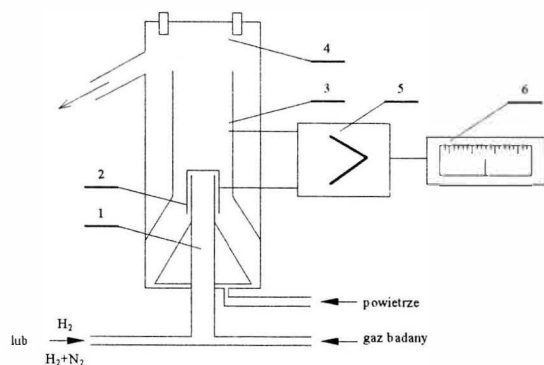
Analizatory te działają na zasadzie porównywania absorpcji promieniowania podczerwonego badanego związku zawartego w spalinach i gazu wzorcowego (porównawczego) obojętnego, którego pochłanianie jest równe zero. Wykonuje się je jako jedno- i dwustrumieniowe (dwa źródła promieniowania podczerwonego) oraz jako jedno- lub dwukuwetowe. Obecnie nowoczesne analizatory typu NDIR budowane są prawie wyłącznie jako jednostrumieniowe, co poprawia dokładność pomiaru, eliminując błędy związane z niejednorodnością promieniowania podczerwonego. Budowę jednostrumieniowego analizatora NDIR o dwóch kuwetach przedstawiono na rysunku 19.

Analizatory płomieniowo-jonizacyjne typu FID stosowane są do oznaczenia w spalinach i powietrzu sumarycznej ilości HC, często określanych THC, oraz metanu (CH<sub>4</sub>), co pozwala również określić zawartość węglowodorów bez uwzględnienia metanu (NMHC).

Analizatory FID (rys. 20) działają na zasadzie jonizacji płomienia wodorowo-tlenowego (jest on w znikomym stopniu zjonizowany) poprzez wprowadzenie do niego cząsteczek węglowodorów. Jonizacja płomienia jest proporcjonalna do liczby atomów węgla wprowadzonych w jednostce czasu.



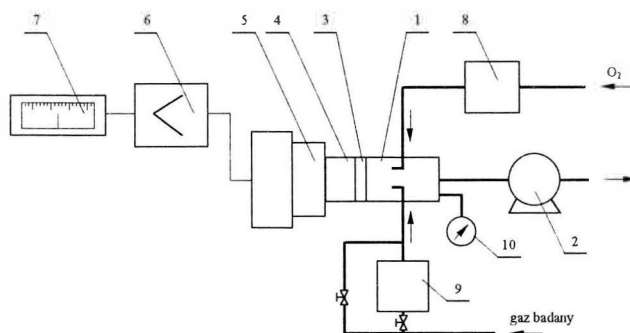
Rys. 19. Schemat jednostrumieniowego analizatora typu NDIR o dwóch kuwetach: 1 – promiennik podczerwieni, 2 – filtr optyczny, 3 – wirująca przesłona modulująca, 4 – okna kwarcowe, 5 – kuweta porównawcza, 6 – kuweta pomiarowa, 7 – przednia komora detektora, 8 – mikrofon pojemnościowy, 9 – przepona, 10 – tylna komora detektora ze szczeliną dla wiącej przepływ gazu, 11 – wzmacniacz, 12 – miernik



Rys. 20. Schemat analizatora płomieniowo-jonizacyjnego (FID): 1 – palnik wodorowo-tlenowy, 2 – elektroda zimna, 3 – elektroda gorąca, 4 – spirala zapalnika, 5 – wzmacniacz-zasilacz, 6 – miernik

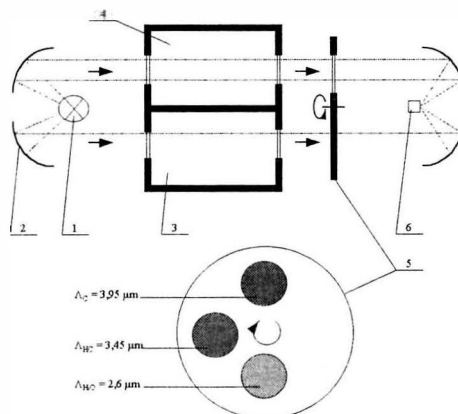
Analizator chemiluminescencyjny typu CLD wykorzystuje zjawisko emisji promieniowania elektromagnetycznego o długości fali 0,6÷3 mm, towarzyszące reakcji tlenku azotu NO z ozonem O<sub>3</sub>. Reakcja ta zachodzi jedynie w warunkach zbliżonych do absolutnej próżni. Schemat zespołu urządzeń składających się na analizator chemiluminescencyjny przedstawiono na rysunku 21.

Inną grupą przyrządów pomiarowych stanowią analizatory do pomiaru cząstek stałych PM. Ten rodzaj analizy spalin dotyczy głównie silników z zapłonem samoczynnym i polega na określeniu cech fizycznych cząstek stałych, takich jak masa, rozkład wymiarowy i kształt, przy czym w badaniach homologacyjnych pomiar dotyczy głównie masy.



Rys. 21. Schemat chemiluminescencyjnego analizatora tlenku azotu: 1 – reaktor, 2 – pompa próżniowa, 3 – okno kwarcowe, 4 – filtr optyczny, 5 – fotopowielacz, 6 – wzmacniacz, 7 – miernik, 8 – wytwarzacz ozonu, 9 – konwerter dwutlenku azotu, 10 – podciśnieniomierz

Przykładem urządzeń do dynamicznego pomiaru cząstek stałych są analizatory DPA 480 i DPA 482 firmy AVL (rys. 22) [1]. Zasada działania analizatorów jest podobna do typowych analizatorów optycznych (por. rys. 19).



Rys. 22. Zasada działania dynamicznego analizatora PM AVL DPL 482: 1 – źródło promieniowania podczerwonego, 2 – zwierciadła, 3 – kuweta pomiarowa (spaliny), 4 – kuweta wzorcową (powietrze), 5 – wirująca przesłona z filtrami interferencyjnymi, 6 – detektor

Źródło: Application of the DPA 480/DPL 482, AVL List GmbH, Graz 1991

Porównywana jest absorpcyjność gazu wzorcowego (czystego powietrza) i spalin. Różnica polega na użyciu do przesłaniania próbki spalin rozszczepionego promieniowania podczerwonego i zastosowaniu obrotowej przesłony świetlnej wraz z filtrami interferencyjnymi. Promienie elektromagnetyczne (o długości poniżej 4 μm), przechodząc przez komorę pomiarową, są absorbowane przez cząstki stałe. Filtry interferencyjne zamontowane są na obrotowej przysłonie świetlnej, dzięki czemu możliwy jest pomiar dwóch, a nawet trzech wielkości (zawartość węgla C, HC oraz λ – dla analizatora AVL 482).

Dla wszystkich przypadków badania emisji PM nieodzowne jest pobranie reprezentatywnej próbki cząstek stałych ze strumienia badanych spalin. Zatem bardzo ważne są metody i urządzenia służące do poboru próbki cząstek stałych w silnikach spalinowych.

Elementy składowe systemów poboru próbki mogą być różne w zależności od celu pomiaru, ale generalnie system stanowią trzy zasadnicze moduły [20]:

- tunel rozrzedzający lub układ wylotowy silnika z zamocowanymi w nim sondami pomiarowymi,
- urządzenie wychwytyjące cząstki i zabezpieczające pozostałe elementy układu,
- mierniki natężenia przepływu i temperatury oraz urządzenia wymuszające bądź wspomagające przepływ.

Wszystkie pomiary homologacyjne wymagają rozcieńczenia spalin turbulentnym powietrzem o temperaturze  $20 \pm 30^\circ\text{C}$ , przy czym nie może wykroplić się woda, a sam pomiar PM odbywa się w temperaturze  $52 \pm 3^\circ\text{C}$  [12]. Mieszanie spalin z powietrzem o różnym stopniu rozcieńczenia zależnym od warunków pracy silnika i charakteryzowane współczynnikiem mieszania  $q$  ( $q = \text{powietrze/spaliny}$ ), odbywa się w specjalnych urządzeniach zwanych tunelami rozcieńczającymi (*Dilution Tunnel*; rys. 23).

Pobór próbek przeprowadza się z zastosowaniem dwóch metod:

- metody jednej pary filtrów,
- metody określonej liczby par filtrów.

W metodzie jednej pary filtrów cząstki stałe zbiera się na jednej parze bibulek filtracyjnych podczas całego cyklu badań, składającego się z określonej liczby faz pracy silnika. Wadą metody jednej pary filtrów jest uśrednianie emisji z określonej liczby faz pracy silnika, a zaletą mniejsza pracochłonność i niższy koszt badań.

W układach pełnoprzepływowych (w metodzie jednofiltrowej) prawidłowe kształtowanie testu polega na właściwym sterowaniu czasem trwania pomiaru PM w poszczególnych jego fazach. Czas próbkowania dla metody pojedynczego filtra wynosi co najmniej 20 s.

Dla metody jednofiltrowej emisję cząstek stałych oblicza się z zależności [14]:

- dla testu na hamowni silnikowej:

$$PM = \frac{PM_F}{\sum_{i=1}^n N_{ei} \cdot u_i} \quad [\text{g/kWh}], \quad (5)$$

gdzie:  $PM_F$  – przypadająca na czas pomiaru masa PM na filtrze [g/h],

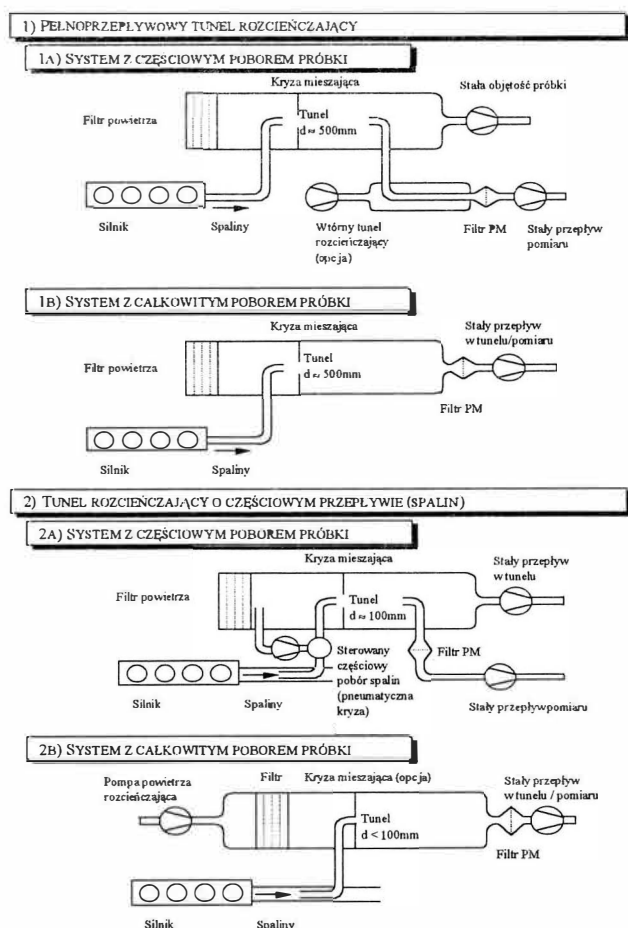
$N_{ei}$  – zredukowana moc użyteczna w  $i$ -tej fazie [kW],

$u_i$  – współczynnik udziału pracy w  $i$ -tej fazie.

W metodzie wielu filtrów używa się jednej pary filtrów dla każdej fazy testu, a więc liczba par filtrów równa się liczbie faz pracy w cyklu badań silnika. Wadą metody określonej liczby par filtrów jest duża pracochłonność i zwiększony koszt badań, a zaletą dokładny pomiar masy cząstek stałych w każdej fazie pracy silnika. Czas próbkowania dla metody wielu filtrów wynosi co najmniej 60 s dla jednego filtra.

Metoda określonej liczby par filtrów jest

również stosowana w badaniach urzędowych, zwłaszcza tych, w których występuje znacząco wysoki poziom emisji cząstek stałych, lecz nadaje się lepiej do badań poznawczych i rozwojowych niż metoda jednej pary filtrów.



Rys. 23. Sposoby poboru próbki (rodzaje tuneli rozcieńczających)

Źródło: Materiały firm: AVL, BOSMAL, BECKMAN, HORIBA, RICARDO

Dla metody wielofiltrowej emisję cząstek stałych oblicza się według zależności [14]:

$$PM = \frac{\sum_{i=1}^n PM_{Fi} \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n N_{ei} \cdot u_i} \quad [\text{g/kWh}], \quad (6)$$

gdzie:  $PM_{Fi}$  – przypadająca na czas pomiaru masa PM na filtrze w  $i$ -tej fazie [g/h],

$N_{ei}$  – zredukowana moc użyteczna w  $i$ -tej fazie [kW],

$u_i$  – współczynnik udziału pracy w  $i$ -tej fazie.

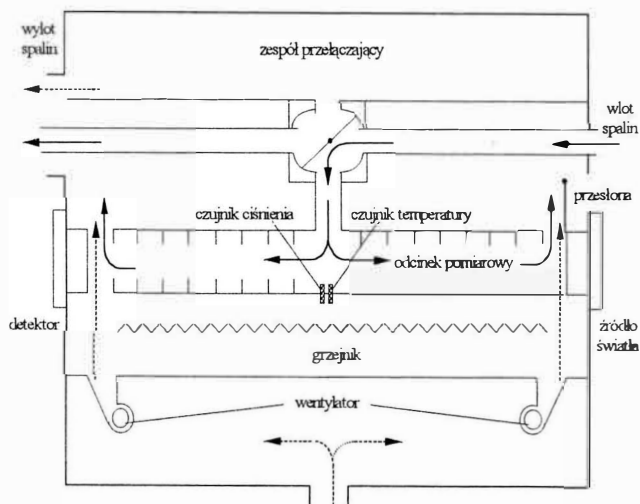
Obecnie do badań homologacyjnych wymagane są hamownie klimatyzowane dla zapewnienia stałych wartości: temperatury i wilgotności względnej powietrza.

## 4.2. Pomiar zadymienia spalin

Z uwagi na fakt, że nie opracowano dostatecznie prostych, tanich i szybkich metod określających poziom emisji cząstek stałych, zastępczo lub uzupełniająco wykonuje się pomiar zadymienia spalin. Mają na to wpływ następujące czynniki:

- historycznie pomiar zadymienia spalin obowiązywał przed wprowadzeniem pojęcia cząstek stałych,
- sadza jest zasadniczym elementem PM,
- pomiar zadymienia wykonuje się w teście ECE R24 oraz w teście swobodnego przyspieszania na biegu luzem (tzw. *free acceleration*).

W Unii Europejskiej podstawowymi przepisami określającymi wartości zaczernienia jest norma ECE R24, która dotyczy dopuszczenia do eksploatacji silników ZS samochodów osobowych, ciężarowych oraz silników przeznaczonych do innych zastosowań. Urządzeniem pomiarowym spełniającym wymogi wymienionej regulacji prawnej jest dymomierz absorpcyjny AVL 438 (rys. 24) [20]. Zasada działania polega na pobraniu części spalin przez sondę z rury wylotowej pojazdu, doprowadzeniu ich przewodem do ogrzanej komory pomiarowej, przez którą przechodzi strumień światła wytwarzany przez lampę, a odbierany przez detektor. Zaczernienie badanych spalin powoduje osłabienie natężenia wiązki promieni.



Rys.24. Dymomierz absorpcyjny AVL 438 – zasada działania

Źródło: Materiały firm: AVL, BOSMAL, BECKMAN, HORIBA, RICARDO

## 1. Zakończenie

Tendencje dotyczące badań i rozwoju norm emisji składników toksycznych można określić następująco:

- ujednolicenie we wszystkich krajach przepisów dotyczących norm i badań do wymogów USA (przede wszystkim norm EU z USA),
- zwiększenie stopnia złożoności i pracochłonności badań homologacyjnych poprzez wprowadzenie różnych i coraz bardziej reprezentatywnych kombinacji testów (*Compliance Test*) w badaniach rozwojowych, z wykorzystaniem tzw. analizy modalnej, czyli określenia chwilowej emisji związków toksycznych w nieustalonych warunkach pracy silnika,
- wprowadzenie norm limitujących oprócz sumy węglowodorów, poszczególne ich związki o największej toksyczności, zwłaszcza z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych PAH (np. benzo(a)piren, fluoranten) lub inne związki toksyczne (np. benzen, aldehyd mrówkowy HCHO),
- wprowadzenie limitów emisji CO<sub>2</sub>, a więc programu obniżenia zużycia paliwa,
- rozszerzenie norm emisji na wszystkie typy stosowanych silników i ich zastosowania (ISO),

z uwzględnieniem specyfiki silników na paliwa alternatywne,

- rozwój metod kontroli spełnienia limitów emisji w pojazdach będących w eksploatacji, poprzez wprowadzenie okresowej kontroli na mniej skomplikowanych niż w badaniach homologacyjnych stanowiskach hamownianych w uproszczonych testach.

## Literatura

- [1] Application of the DPA 480/DPL 482. AVL List GmbH, Graz 1991.
- [2] AVL Consulting and Information: Current and future exhaust emissions legislation, AVL List GmbH, Graz 1997.
- [3] Bielaczyc P., Merksiz J.: Testy parowania w badaniach emisji związków toksycznych z pojazdów samochodowych. KONMOT'96. Tom I: Silniki Spalinowe. Konstrukcja i badania. Kraków 1996.
- [4] Code of Federal Regulations, Protection of environment, Title 40, Parts 86. Revised as of July 1, 1995. U.S. Government Printing Office Washington 1995.
- [5] Council Directive of 26 June 1991 (91/441/EEC). Official Journal of the European Communities No L242/1, 30.08.91.
- [6] Directive 94/12/EC of the European Parliament and the Council of 23 March 1994 relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending Directive 70/220/EEC; Commission Directive 96/44/EC of 1 July 1996 Directive 96/69/EC of 8 October 1996.
- [7] Environmental benefits of proposed emission standards for locomotives, EPA 420-F-97-009, February 1997.
- [8] ISO: Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions. Draft International Standard ISO/DIS 8178-1.2, 1995.
- [9] Lange W., Reglitzky A., Krumm H., Cowley L.: The influence of diesel fuel on exhaust emission. Motortechnische Zeitschrift 10, 1993.
- [10] Lemaire J., Mustel W., Zelenka P.: Fuel additive supported particulate trap regeneration possibilities by engine management system measures. AVL LIST GmbH, Graz 1994.
- [11] Merksiz J.: Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [12] Merksiz J.: Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1993.
- [13] Raport ORE B13.
- [14] Reciprocating Internal Combustion Engines – Exhaust Emission Measurement. Draft International Standard ISO/DIS 8178-1.2, 1995.
- [15] Tritthart P., Cartellieri W.P.: Diesel particulate emissions - experience and results. World Car Conference, California 21-24 January 1996.
- [16] United Nations. Agreement done at Geneva on 20 March 1958. Addendum 82: Regulation No. 83, Revision 1, E/CE/TRANS/505, 1 July 1993 (01 series of amendments); Revision 1 - Amendment 1, 2 July 1995 (02 series of amendments); Revision 1 - Amendment 2, 21 March 1997 (03 series of amendments).
- [17] Vetter T., Fehl G.: The modern exhaust gas laboratory for development of environment friendly engines. SAE Paper No 952286E.
- [18] Walsh M.: Global trends in diesel emissions control - A 1997 Update. SAE Paper No 970179.
- [19] Wojcik K.M., Carstensen H., Cartellieri W.: Progress in the pollutant reduction of vehicle engines. 3rd Symposium: Traffic Induced Air Pollution - Emissions, Impact and Air Quality, TU-Graz, 1996.
- [20] Materiały firm: AVL, BOSMAL, BECKMAN, HORIBA, RICARDO.